

水塊の衝突における空気膜由来の圧力振動

| | |
|--------|---|
| 著者 | 呉 俊昌 |
| 学位授与機関 | 東京海洋大学 |
| 学位授与年度 | 2016 |
| URL | http://id.nii.ac.jp/1342/00001407/ |

修士学位論文

水塊の衝突における空気膜由来の圧力振動

平成 28 年度
(2017 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻

呉 俊昌

目次

| | |
|---------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 背景 | 2 |
| 1.2 目的 | 3 |
| 第2章 実験方法 | 4 |
| 2.1 自由落下型水塊衝突実験 | 5 |
| 2.1.1 実験概要 | 5 |
| 2.1.2 実験装置 | 6 |
| 2.1.3 水塊作成方法 | 14 |
| 2.2 予備実験 | 18 |
| 2.2.1 平板の固有振動数 | 18 |
| 2.2.2 圧力センサの性能評価 | 21 |
| 2.2.3 実験手順 | 23 |
| 第3章 実験結果と考察 | 24 |
| 3.1 自由落下型水塊衝突実験 | 25 |
| 3.1.1 実験条件 | 25 |
| 3.1.2 水塊の落下・衝突・崩壊過程 | 26 |
| 3.1.3 運動量の変化による作用 | 27 |
| 3.1.4 衝撃圧力の測定 | 30 |
| 3.1.5 水風船を用いた実験 | 35 |

| | |
|---------------------------|--------|
| 3.2 空気膜の挟み込みによる圧力振動 | 40 |
| 3.2.1 以前の研究理論..... | 40 |
| 3.2.2 実験概要 | 44 |
| 3.2.3 実験結果 | 45 |
| 3.2.4 空気の挟み込み量 | 51 |
| 第4章 結論 | 53 |
| 参考文献..... | 55 |
| 謝辞 | 56 |
| 付録 | 57 |

第 1 章

序論

1.1 背景

近年、海洋の資源を利用するために、海洋上に構造物を建設する機会が増えている。これら海面に接する構造物を設計する際には、浮力、波力などが考えられるが、特に防波堤のような構造物に打ち付ける砕波力や、荒天時に航行する船舶に対するスラミング衝撃は、瞬間的に非常に大きな力が作用することがあるため注意を要する。このため水面と物体（構造物）との衝突に関する研究は 1920 年代から活発に行われてきた。

これら従来の研究の多くは、水面と物体のどちらの衝突面を平坦とみなすかによって、次の二つのアプローチに分類できる。一つは物体と平坦な水面の衝突である。これは Fig.1 (A, B) に示すように飛行艇や救命艇が着水する際の衝撃力に端を発しており、例えば荒天時の船体運動により船底が水面に突入する際の船底スラミングなどを対象とする。もう一つは平坦な物体と水面との衝突である。これは Fig.1 (C, D) に示す防波堤に対する巻波の砕破衝撃や洋上風力発電への波の衝突などを対象とする。Mitsuyasu によると平らではない水面（巻波）が空気を巻き込み、物体（防波堤等の構造物）との間に空気膜を介在しつつ衝突すると、この空気膜が断熱圧縮されることに起因する振動的作用が観測されると言及している¹⁾。

この衝撃的に加わる作用は、海洋上に設置する構造物を設計する際に考慮すべきである。



A. 救命艇の着水
(出典：信貴造船所 HP)



B. 飛行艇の着水
(出典：新明和工業 HP)



C. 防波堤への波の衝突



D. Breaking waves against an offshore wind turbine
(出典：Maritime Research Institute Netherlands HP)

Fig.1 水面と物体の衝突

1.2 目的

本研究では, Fig.1 に示す流体と構造物の衝突や Fig.2 に示す船舶甲板への打ち込み水を想定しつつ, なるべく基礎的な実験系として, 自由落下する水塊が平板に衝突する際に生じる衝撃圧力の計測を行う. また高速度カメラにて水塊の衝突・崩壊過程の観察を行う.

海洋構造物の設計への応用を念頭に, 衝撃圧力の発生メカニズムの解明を行うことを目的としている.



Fig.2 船舶甲板への打ち込み水

第 2 章

実験方法

2.1 自由落下型水塊衝突実験

本研究では，自由落下する水塊が平板に衝突する際の衝撃力を計測する．また落下水塊の衝突から崩壊までの過程を観察する．このように，波や水塊を物体に衝突させる実験を行う場合は，再現性よく波や水塊を生じさせることが難しく，装置は複雑になりがちである．そこで本研究では，水塊の形成方法を工夫し，簡易な方法で水塊と平板の衝突実験を行う．

2.1.1 実験概要

本実験の装置概略図を Fig.3 に示す．圧力センサの埋め込まれた板の上方に，ゴムシートで下端を塞いだ円筒を配置し，水道水を溜める．ゴムシートを破けば，円筒内の水が塊となって自由落下し平板に衝突する．この際に平板に作用する衝撃圧力を圧力センサによって測定し，水塊が衝突により崩壊する過程を高速カメラにより観察する．

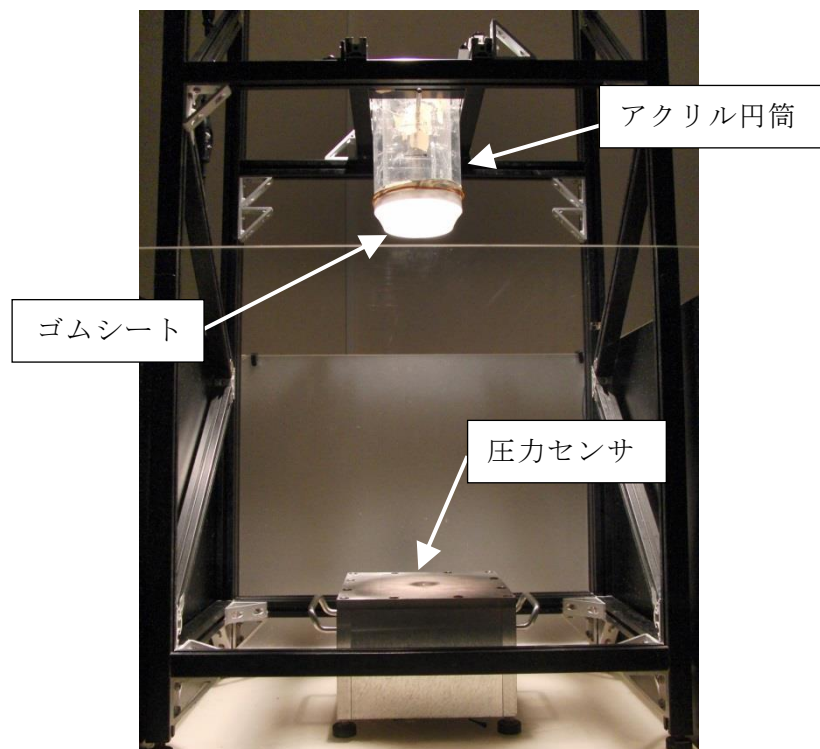


Fig.3 実験装置

2.1.2 実験装置

(ア) 水塊作成装置

水塊を作成する装置は(Fig.4), 径の異なるアクリル製円筒を二本使用する. 太いアクリル円筒は厚さ 5mm, 内径 130mm であり, 円筒内側には厚さ 10mm のフッ素系ゴムが接着してある. これはもう一方の細いアクリル円筒 (厚さ 5mm, 内径 100mm) を中に入れる際, 細いアクリル円筒の位置決めをするためにある³⁾. 二本円筒を使用する理由と水塊の作成方法は節 2.1.4 に詳しく説明する.

円筒内に水を溜めるためにゴムシートを使用する. ゴムシートは, 市販の風船を使用する.

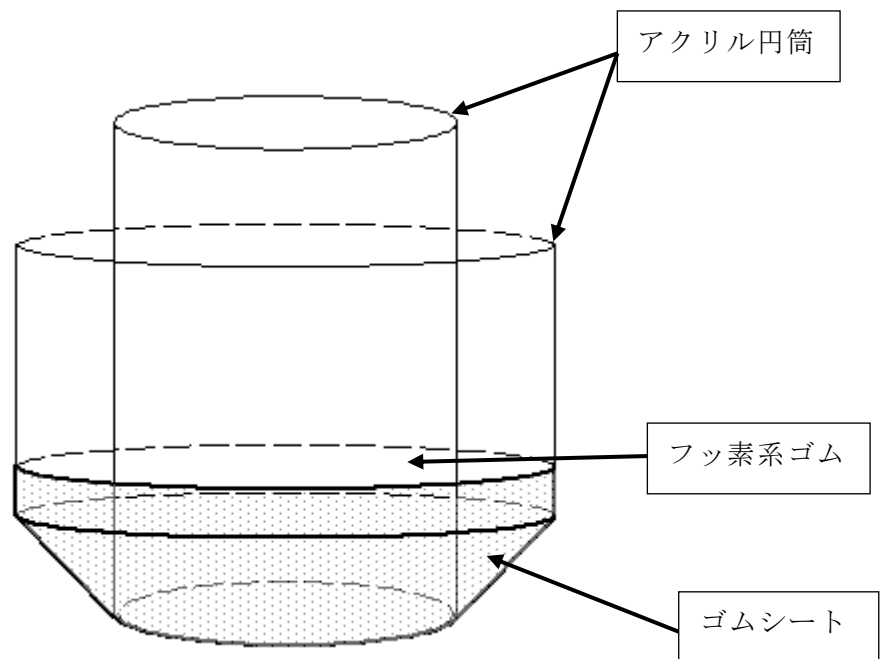


Fig.4 ゴムシートの貼り方

(イ) 圧力センサ

本研究では二種類の圧力センサを使う．ひずみゲージ式の PS-5KD と圧電素子式の ICP である．

I .ICP

PCB PIEZOTRONICS Inc.製(Fig.5), ICP 型 Dynamic Pressure Sensor, Model S112A22 で計測する．Table1 に圧力センサの仕様を示す．

Table1 圧力センサ仕様

| | |
|---------|----------|
| 測定レンジ | 345 kPa |
| 耐圧 | 3450 kPa |
| 共振周波数 | 250 kHz |
| 下限周波数 | 0.5 kHz |
| 圧電素子 | 水晶 |
| 測定面の大きさ | 5.54mm |



Fig.5 圧力センサ ICP
(出典：PCB HP)

このセンサの構造は，圧電素子として水晶を用い，インピーダンス変換素子を内蔵し，ICP と呼ばれるアンプ（電荷/電圧変換回路）内蔵構造になっている（Fig.6）．原理は結晶（圧電素子である水晶）に力が加わり，応力が生じると電機分極が生じる．この分極により電荷が発生する．電荷の発生量は結晶に加わる力に比例している．この電荷量を計測することによりその力の量を知ることが出来る．これを圧電効果という（Fig.7）．

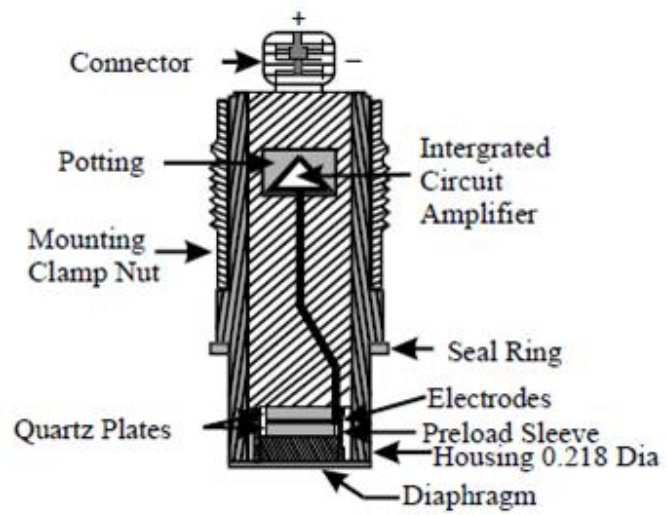


Fig.6 ICP 型圧力センサの構造
(出典：PCB HP)

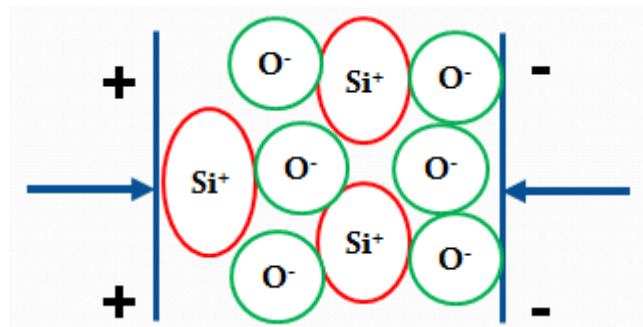


Fig.7 圧電効果概要
(出典：PCB HP)

圧力センサからの信号は PCB PIEZOTRONICS Inc.製 ICP 用シグナルコンディショナー Model 482A21/NP (Fig.8) で増幅し，その後 GRAPHTEC 製アンプユニット GL-7000 と電圧ユニット GL7-HSV (Fig.9) で集録する． Table2 にシグナルコンディショナー， Table3 に電圧ユニットの仕様を示す．



Fig.8 シグナルコンディショナー
(出典：PCB HP)

Table2 シグナルコンディショナー仕様

| | |
|--------|--------|
| 低周波数応答 | 0.1 Hz |
| 高周波数応答 | 1 MHz |



(GL7-HSV)



(GL-7000)

Fig.9 ユニット
(出典：GRAPHTEC HP)

Table3 電圧ユニット仕様

| | |
|----------|------------------|
| サンプリング速度 | 1MHz (1 μ s) |
| 分解能 | 16 bit A/D |

II.PS-5KD

共和電業製，PS-5KD で計測する (Fig.10)．Table4 に圧力センサの仕様を示す．

Table4 圧力センサ仕様

| | |
|---------|----------|
| 定格容量 | 500 k Pa |
| 応答周波数 | 2.5 k Hz |
| 測定面の大きさ | 6mm |



Fig.10 圧力センサ PS-5KD
(出典：共和電業 HP)

このセンサは変換素子にひずみゲージを使用し、センサ内部でブリッジを構成し小型薄肉構造をした圧力変換器である。ひずみゲージを使用したセンサとは、金属（抵抗体）は外力を加えて伸縮させると、ある範囲でその抵抗値も増減する。したがって、ひずみが生じる測定対象物に電気絶縁物を介して接着しておけば、測定対象物の伸縮に比例して金属（抵抗体）が伸縮し抵抗値が変化する。ひずみゲージ（電気抵抗式）はこの抵抗変化によりひずみを測定するセンサである。

センサからの信号は GRAPHTEC 製ひずみユニット GL7-DCB で測定し、アンプユニット GL-7000 で集録する（Fig.11）。Table4 にひずみユニットの仕様を示す。



Fig.11 ユニット
（出典：GRAPHTEC HP）

Table4 ひずみユニット仕様

| | |
|----------|----------------------|
| サンプリング速度 | 100kS/s (10 μ s) |
| 分解能 | 16 bit A/D |
| 周波数応答 | DC～20kHz |

(ウ) 撮影用のカメラと撮影環境

水塊の落下から衝突，崩壊する際の水塊形状の撮影用として高速度カメラ HAS-220 を使用する (Fig.12)．エンドレス録画とセンタートリガの機能を持つ．圧力データの収録と撮影が同期をできる．Table5 に高速カメラの仕様を示す．

Fig.13 に示すような環境で水塊の形状を撮影する．水槽後ろ側には磨硝子調の亚克力板を設置する，水槽真後ろから照明の光を拡散することができる．側面からの光を反射を防ぐため，側面にはマッドブラック色の亚克力板を設置する．照明を水槽真後ろから照らし，水塊が平板に衝突する部分のみ光が集まるようにした．この方法では落下水塊の輪郭には影ができ，水塊衝突形状がはっきり写るように撮影できる．Fig.14 は水塊撮影の写真一例である．



Fig.12 高速カメラ
(出典：ditect HP)

Table5 高速カメラの仕様

| | |
|---------|---------|
| カメラタイプ | モノクロ |
| フレームレート | 500fps |
| 画像サイズ | 640×164 |

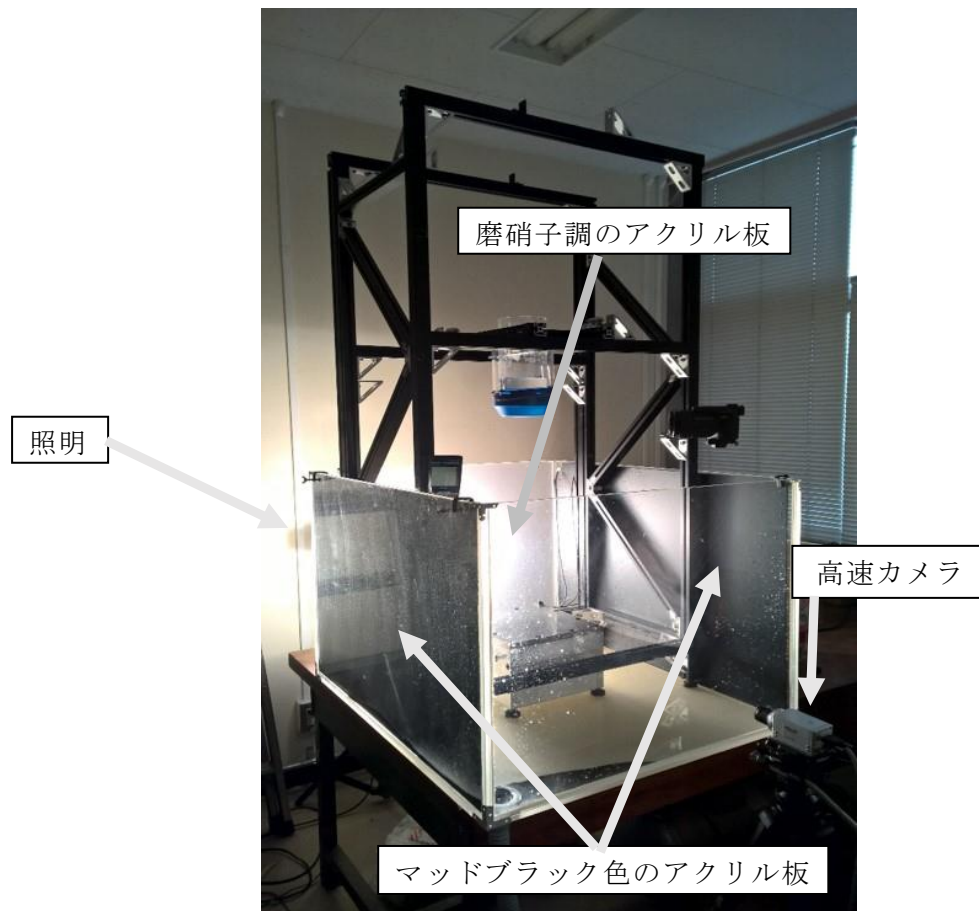


Fig.13 撮影環境



Fig.14 水塊撮影の一例

2.1.3 水塊作成方法

本研究のような実験を行う場合、整った形の水塊を再現性よく作成することが大切である。そこで水塊の作成は、水を溜めたアクリル円筒の下端を塞ぐゴムシートを破いて落とすという方法を用いる。

2.1.2 節より、水を溜めるアクリル円筒は、径の異なる二本を用いる。太い方の円筒下端をゴムシートで塞ぎ、細い方の円筒をゴムシートに押し込み、緊張させて固定する。Fig.15 に水塊作成方法を示す³⁾。アクリル円筒を二重構造にすることにより、ゴムシートの膜厚を薄く均一に張り詰めることができる。またゴムシートが破ける際にアクリル円筒の縁にゴムシートが破れ残ることで、水塊形状を乱すことがあるが、二重構造のアクリル円筒の採用はこれを防ぐ狙いもある。シートが外筒の縁まで一気に広がることで、水塊が通り抜ける内筒の縁にはシートが残りにくい。

過去の実験でのゴムシートを破く方法は³⁾、有機溶剤であるリモネンを噴霧し、ゴムシートを溶かして破く方法を用いていた。有機溶剤で溶かす場合には徐々にゴムシートが溶けて薄くなり破けるため、破裂前のゴムシートの変形を避けることができるが、いつどこで破けるか分からない。このため水塊の形状が毎回同じではない。Fig.16a に示すように形成される水塊形状は実験毎にバラつきがある。圧力変化(Fig.16b)においても最大値のバラツキが大きい。本研究では針を使い、上からゴムシートの真ん中に刺す。一点を押し伸ばして穴をあけることにした。ほぼ同じ形状の水塊を落下させることができる(Fig.17a)。圧力変化(Fig.17b)においても最大値のバラツキが小さい。Fig.17b では、時間経過した後の圧力の推移に差がみられるが、これは圧電素子型のセンサの特性による 2.2.2 で述べるように本研究では、圧力の最大値と振動に注目されているためこの差は重要ではない。

Fig.18 に実際の水塊の形成・落下過程を示す。水量 100mm の場合である。ゴムシートが破け、落下を開始した直後の水塊の底面はほぼ平ら (Fig.18a) であり、円柱形状を保っている (Fig.18b,c)。水塊上端には、円筒内面を沿い落ちた液膜による薄い膜が水塊本体に引き続いている (Fig.18c,d)。また時間が経過するに従い水塊底面から徐々にまるくなる (Fig.18d)。この方法を採用することで、比較的再現性の高い、整った形状の水塊を落下させることができる。

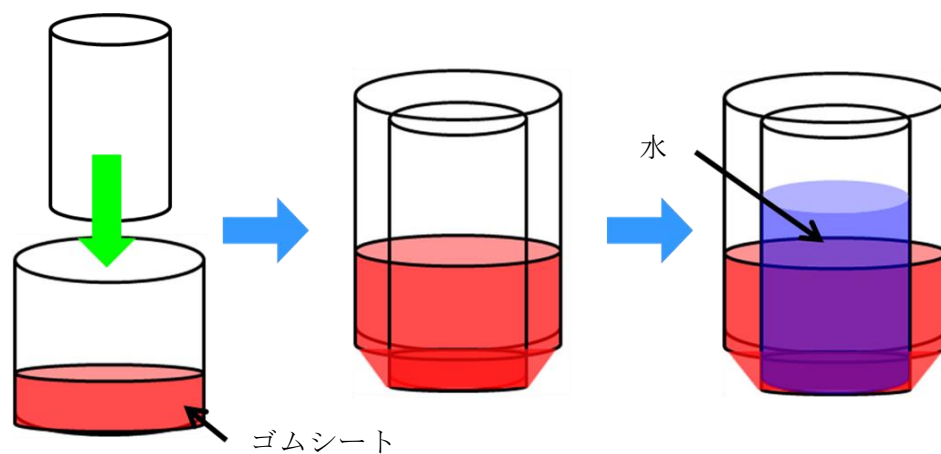


Fig.15 水塊形成方法

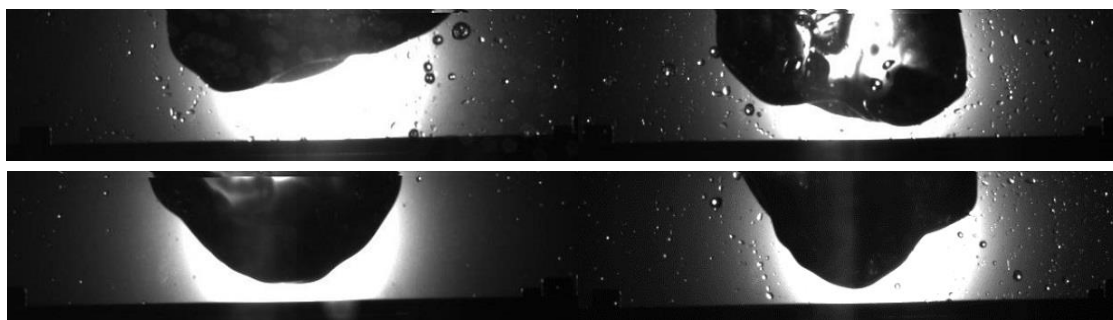


Fig.16(a)リモネンを使用・水塊の形状

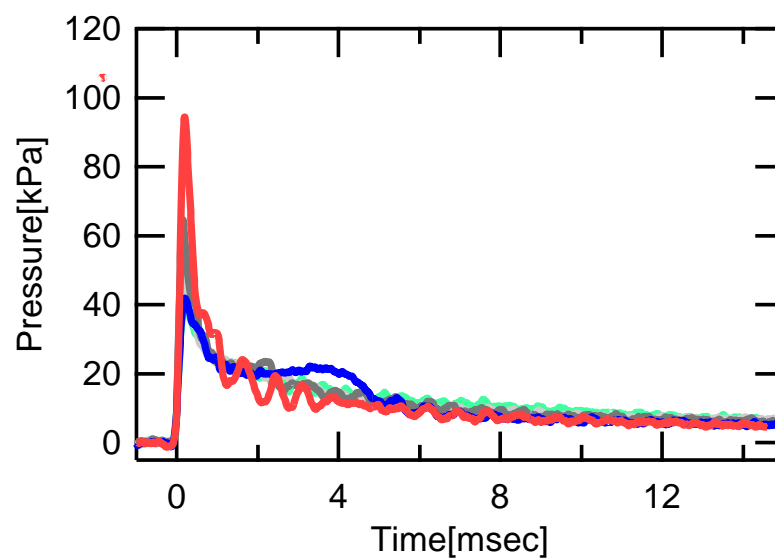


Fig.16(b)リモネンを使用・実験結

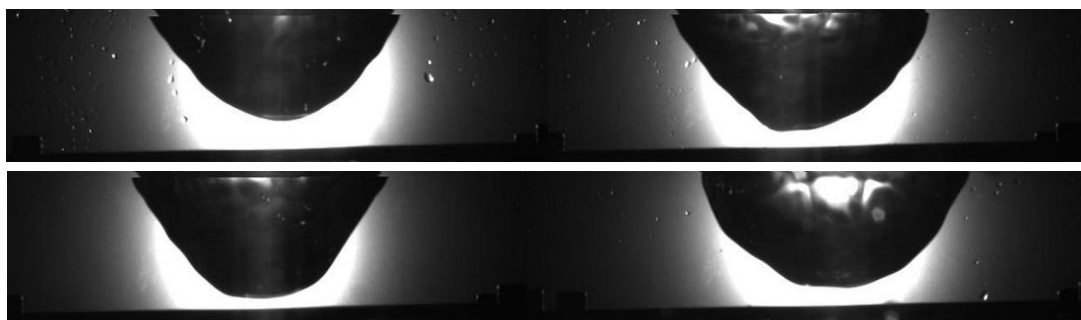


Fig.17(a)針を使用・水塊の形状

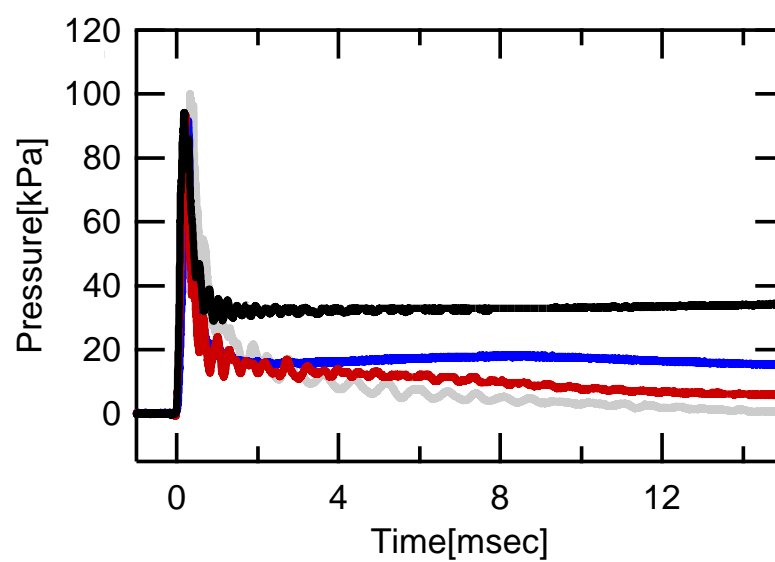


Fig.17(b)針を使用・実験結果

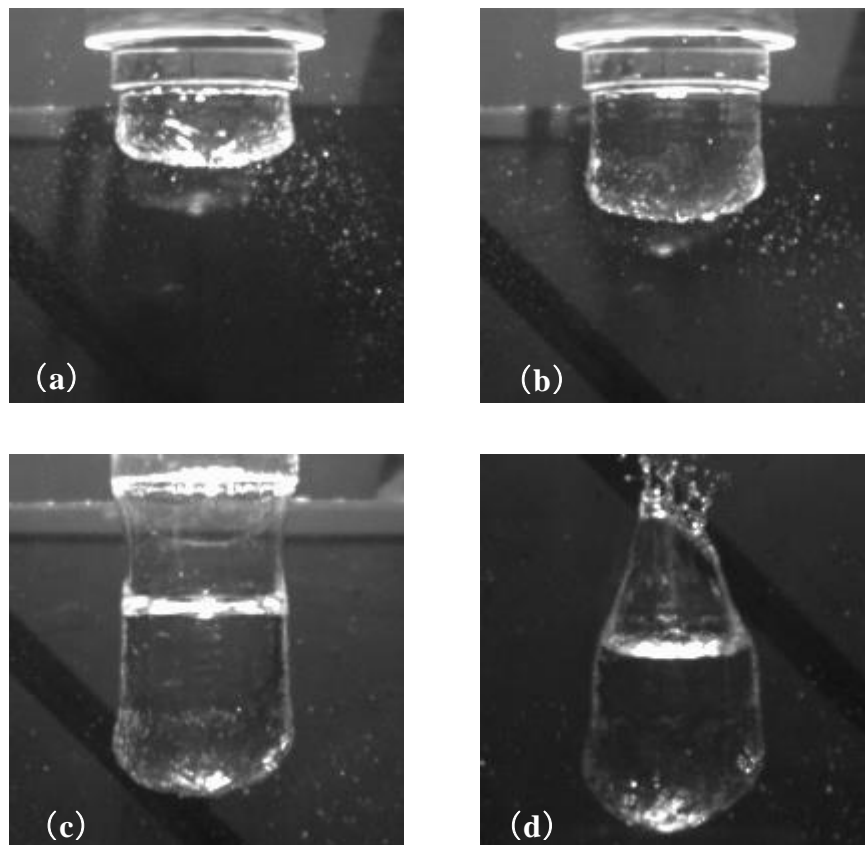


Fig.18 水塊の形成・落下過程

2.2 予備実験

2.2.1 平板の固有振動数

圧力センサは厚さ 20mm のステンレス平板(SUS 304)の中央部に埋め込まれており、平板は周囲 4 辺を厚さ 10mm の板で支持されている。ステンレス平板と支持する板は M8 のネジ 12 本で Fig.19 に示すように固定している。水塊が衝突する物体である、この平板の固有振動数を測定し、共振による影響の有無を調べた。

測定方法は、圧力センサが埋め込まれている平板の四隅を各箇所計三回ずつゴムハンマーで叩き、その際のインパルス応答をレーザドップラ振動計（SONY 製，VL10）により測定し、データロガーで収録した（Fig.20）。

レーザドップラ振動計の仕様を Table6 に示す。レーザドップラ振動計とは、光のドップラー効果を使い、非接触で物体の振動速度を検出する。光学系内で二つに分岐された光の一方の物体光は、測定対象物にあたり、反射されると振動面の速度に応じた周波数変化を受ける。この光を、もう一方の光の参照光と重ね合わせて干渉させると、二つの光の周波数の差が観測される。

測定結果を Fig.21 に示す。このグラフは、レーザドップラ振動計で測定した平板のインパルス応答を高速フーリエ変換（FFT）した結果であり、横軸が平板の振動数（Hz）を対数関数で示している。

この結果から平板の固有振動数は 35Hz であることが分かる。よって測定する圧力波形の振動成分の振動数（500 Hz～）と十分に離れていることから、共振の影響は無視できるとする。

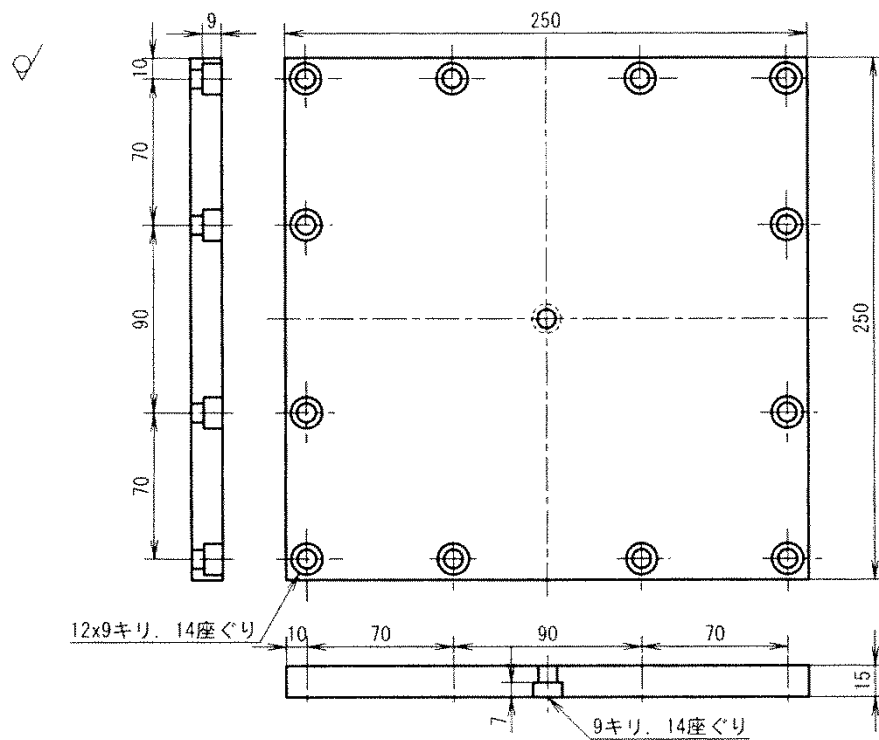


Fig.19 ステンレス平板の寸法

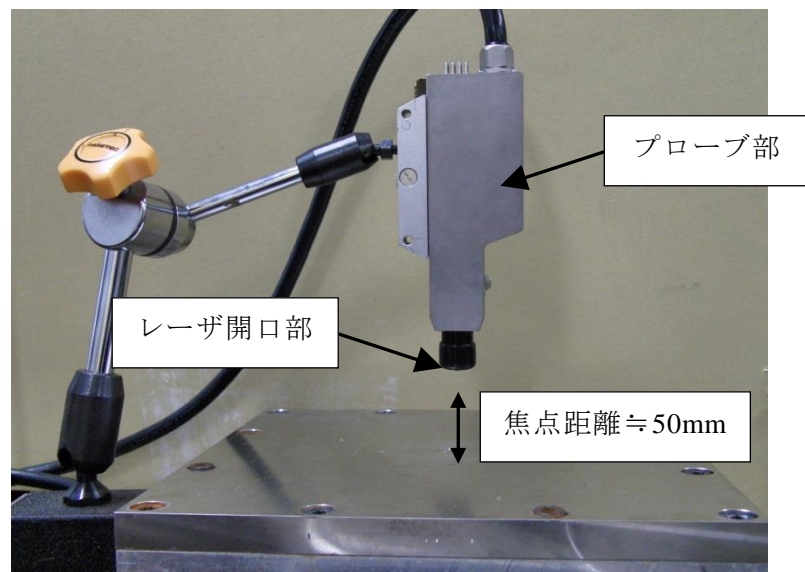


Fig.20 レーザードップラ振動計

Table6 レーザドップラ振動計（VL10）仕様

| | | | | |
|--------|---|-------------|-----------------------|---------|
| 測定ポイント | 出射口より 50 mm | | | |
| レーザ種類 | 半導体レーザ | | | |
| 波長 | 780 nm 可視プローブ LED 光付き | | | |
| 光出力 | 1 mW 以下 | | | |
| 速度測定範囲 | 最大範囲±0.1 m/s (0.01 m/s/V レンジ) 残留ノイズ 2.0 μ m/s 不要スプリアスを除く（スプリアスは規定の+ 20 dB 以下） | | | |
| 速度測定確度 | AC $\pm 2\%$ DC $\pm 4\%$ (完全調節時) | | | |
| 応答周波数 | 0 Hz (DC) \sim 100 kHz (速度出力) | | | |
| 出力仕様 | ± 10 V 出力インピーダンス 200 Ω | | | |
| フィルタ仕様 | | モード | 減衰率 | 遮断周波数 |
| | LPF | 10 kHz | 40 dB/oct | 12 kHz |
| | LPF | Off | 48 dB/oct | 120 kHz |
| | HPF | Off | - | - |
| | HPF | 0.5 Hz | 6 dB/oct | 0.5 Hz |
| | HPF | 100Hz | 24 dB/oct | 100Hz |
| | 積分変位出力 | 変位レンジ | 可能積分帯域 | |
| | 変位 | 0.1 mm/v | 20 Hz \sim 10 kHz | |
| | 変位 | 1 μ m/v | 200 Hz \sim 100 kHz | |

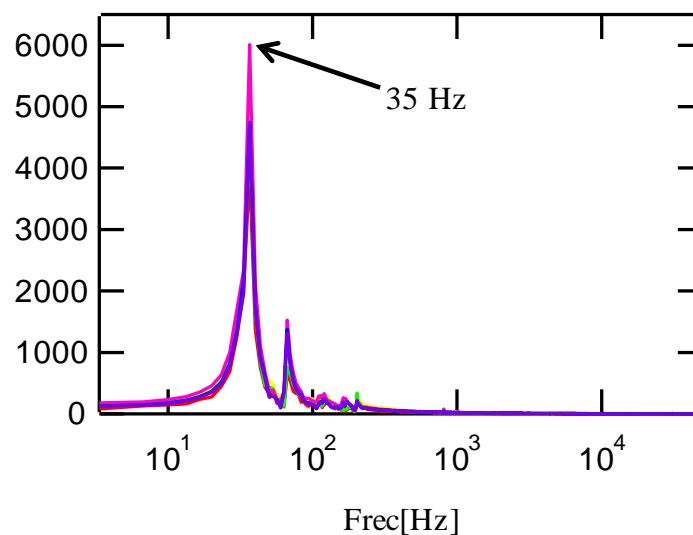


Fig.21 ステンレス平板の固有振動数

2.2.2 圧力センサの性能評価

両センサの仕様を比較すると、ICP 型センサの方が周波数応答が早いことから、瞬間的な圧力との測定に優れていると考えられる。そこで両センサの実験結果から最大圧力の比較をすることにした。

まず各センサで得られる実際の圧力時間変化の一例を Fig.22 (a), (b) に示す。このグラフは横軸が時間 (msec)、縦軸が圧力 (kPa) を示す。このグラフから両センサの圧力の時間変化はほぼ同じ結果が得られることが分かる。ただ、ICP のほうは最終的に圧力は零に戻らない、PS-5KD は零に戻る。

本研究では主に衝撃圧力の最大値と振動について注目しているため、ICP 型圧力センサが応答の早さを重視した。PS-5KD より瞬間的圧力の測定に向いていると判断し、ICP 型圧力センサを採用することとした。以降の節での結果については ICP 型センサの結果によるものとする。

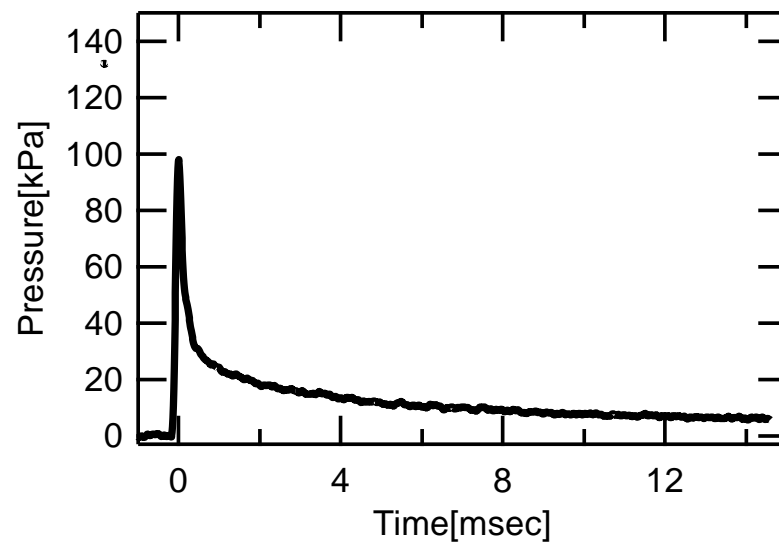


Fig.22 (a) PS-5KD による圧力の時間変化

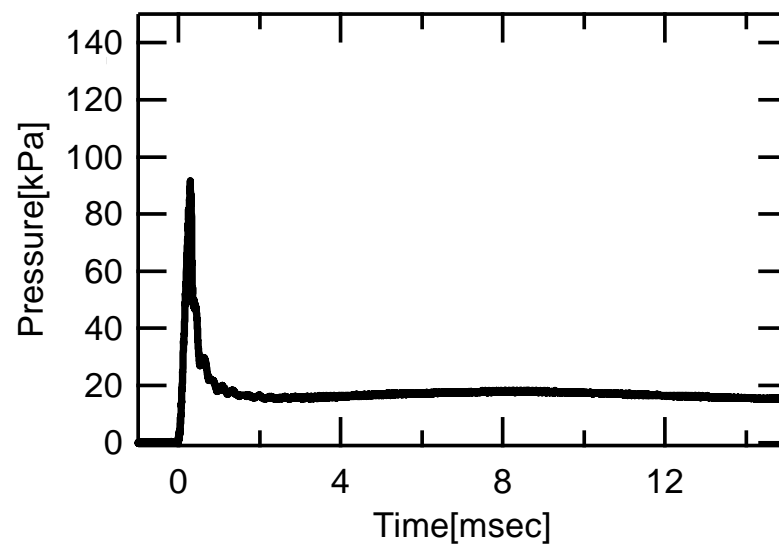


Fig.22 (b) ICP 型センサによる圧力の時間変化

2.2.3 実験手順

実験の手順を以下に示す.

(ア)測定前の準備

- 1) 2.1.3 節のようにアクリルパイプ内に水をためる.
- 2) データロガーのアンプを設定する. レンジを $20V$ で設定し, ゼロ点調整リセットボタンを押す.
- 3) データロガーのトリガーを設定する. 立ち上がり $0.05V$ 以上でデータの集録を開始する.
- 4) アラーム設定する. 立ち上がり $0.05V$ 以上でアラーム信号が発生する. このアラーム信号によりカメラの集録を開始する.
- 5) カメラをフレームレート $500fps$ 設定し, カメラのトリガーをセンターで設定し, トリガー発生 0.03 秒前からの画像を記録する.

(イ)測定手順

- 1) データロガーとカメラの収録開始ボタンを押す.
- 2) アクリル円筒内の水面が静かになったことを確認し, 針で上からゴムシートの真ん中に刺す.
- 3) ゴムシートが破け, 水塊が落下する.
- 4) 落下水塊が平板に衝突し, 圧力センサが衝撃圧力を感知し, データロガーが反応する. 記録を開始する.
- 5) 同時にデータロガーからアラーム信号を受けて, 落下水塊の映像を撮影する.

第 3 章

実験結果と考察

3.1 自由落下型水塊衝突実験

3.1.1 実験条件

Fig.23 に実験装置概略図を示す．圧力センサの感圧面の直径は 5.54mm，圧力センサの鉛直上方にあるアクリル円筒の内径は 100mm である．水塊の落下高さはアクリル円筒下端から圧力センサ表面までの距離 H で設定し， $H=250,500,750,1000\text{mm}$ と調節できる．水塊の水量はアクリル円筒に溜める水の高さ h で決めており， $h=50,100,150,200\text{mm}$ と調節できる．水量 $h=100\text{mm}$ は体積 0.785L に相当する．落下高さ $H=500\text{mm}$ ，水量 $h=100\text{mm}$ を本実験の標準条件とし，今回の結果は全て標準条件での結果によるものとする．また高速度カメラで落下水塊の衝突から崩壊する．

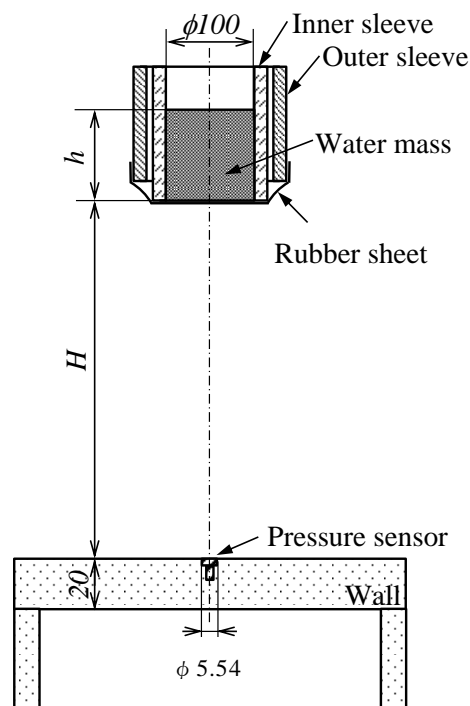


Fig.23 実験装置概要

3.1.2 水塊の落下・衝突・崩壊過程

標準条件にて計 15 回実験を繰り返し行なった．Fig.24 に落下水塊が平板に衝突し，崩壊していく過程を高速度カメラにて撮影した結果の一例を示す．水塊はアクリル円筒の形状を保ちつつ，平板に衝突したと同時に進行方向への速度をなくし，センサ上に乗る．その後，行き場をなくした水塊は崩れるように横へ流れていく様子が観察できる．

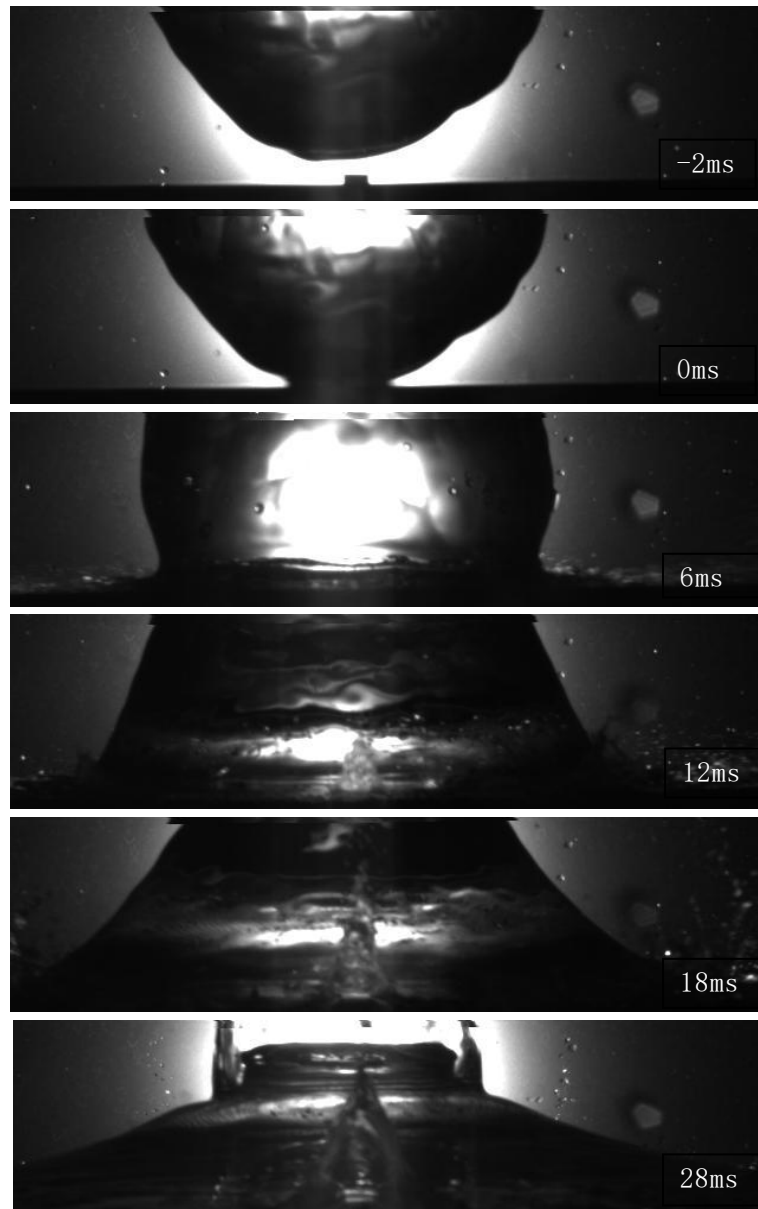


Fig.24 落下水塊の衝突・崩壊過程

3.1.3 運動量の変化による作用²⁾

Fig.24 のように水塊が平板との衝突により落下の進行を妨げられる場合，進行方向の運動量が変化することによる力が作用する．この運動量の変化による作用に基づいた解析モデルを Fig.25，Fig.26 に示す．

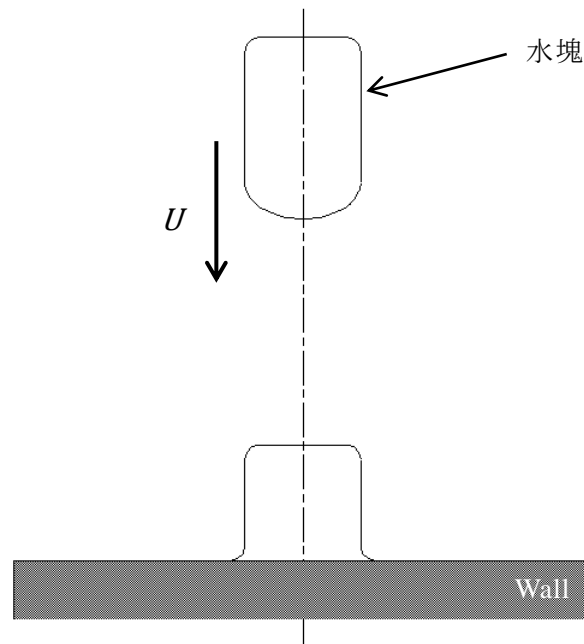


Fig.25 水塊の落下進行

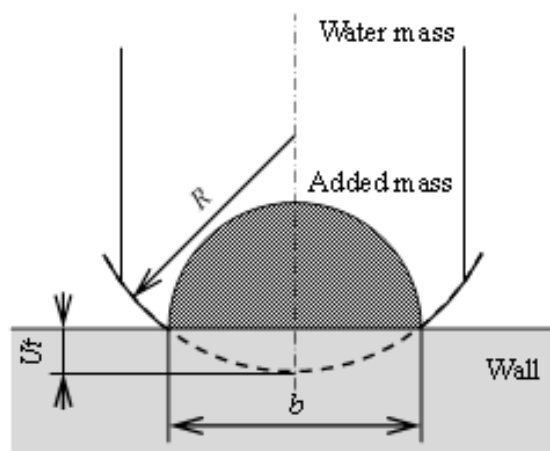


Fig.26 解析モデル

この解析モデルでは、曲率を持った水塊底面が平らな壁面に衝突した場合、水塊落下の進行を妨げられ、その一部が付加質量として平板とともに静止すると考える。また水塊底面は平らではなく、簡単のために球面の一部とみなし、平板は剛性が十分に高く剛体であると仮定すると、以下の有限速度で進展する固液接触域を計算できる。

高さ H にある円筒に溜められた水塊は、速度 $U (= \sqrt{2gH})$ で平板に衝突する。水塊底面は曲率半径 R の球面とし、時間 t とともに広がる固液接触域の幅を b とする。衝突後も一定速度 U で水塊が進行するとすれば、 b は次式で与えられる。

$$b/2 = \sqrt{2RUt - U^2t^2} \quad (12)$$

さらに付加質量が固液接触域に $b/2$ を半径とする半球形状で発達すると仮定すると、その質量 m は水の密度を ρ として、

$$m = C_m \frac{2\rho\pi}{3} \left(\frac{b}{2}\right)^3 \quad (13)$$

である。ただし、ここで付加質量の補正のために係数 C_m を導入している。

また、 C_m は測定結果と解析モデルを比較する際に、調節のための係数として用いる。

この付加質量による運動量の変化が及ぼす作用 F は、

$$\begin{aligned} F &= \frac{d(mU)}{dt} = U \frac{dm}{dt} \\ &= C_m \rho \pi U^2 b R \left(1 - \frac{U}{R}t\right) \end{aligned} \quad (14)$$

と計算できる。固液の接触面積でこの作用を受けるとすれば、圧力 P は以下のように計算できる。

$$P = \frac{F}{\pi(b/2)^2} = 4C_m \rho U^2 \frac{R}{b} \left(1 - \frac{U}{R}t\right) \quad (15)$$

式(15)に基づいて，付加質量の変化による衝撃圧力の時間変化を計算する．Fig.27 のような結果を得る．係数 C_m を調整すれば，実験結果と一致する．

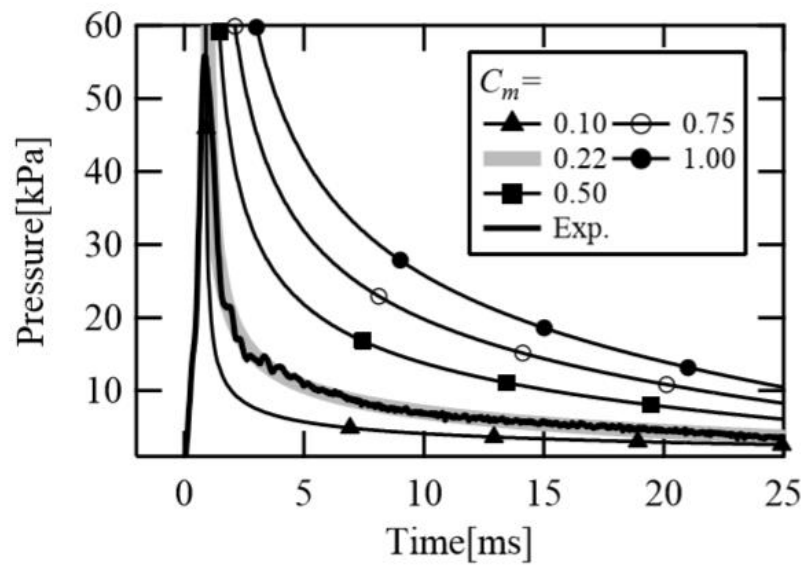


Fig.27 衝撃圧力の時間変化

3.1.4 衝撃圧力の測定

水塊衝突による圧力の時間変化を Fig.28(a), Fig.29(a)に示す. このグラフの横軸は時間 (msec), 縦軸は圧力 (kPa) を示す. すべての衝撃圧力波形で 2 通りの結果が取られた. また, 本研究では Python を用いてフーリエ変換を行うプログラムを作成し, 実験データを FFT 解析した(Fig.28b, Fig.29b).

一つ目の衝撃圧力波形を Fig.28(a)に示す. この結果は水塊衝突直後に最大圧力を取り, その後急激に圧力は減少する. この衝撃圧力波形を非振動型と呼ぶことにする.

二つ目の結果は Fig.29(a)に示す. 非振動型と同様に水塊衝突直後に最大圧力を取り, その後急激な圧力の減少に転じたのちに減衰振動が観察される. FFT 解析の結果からも明確なピークが確認できる. この衝撃圧力波形を振動型と呼ぶことにする. また, 両グラフはいずれも水塊衝突直後に圧力の急激な上昇と下降を経て, 単調な減少を続けるという点は共通するが, 最大圧力の値に差がみられる. そこで非振動型と振動型の最大圧力を比較した. その結果を Fig.30 に示す. この結果から, 振動型の方が非振動型よりも最大圧力が高いことが分かる. これは振動型が生じた時, 水塊が平板に衝突する際に 3.1.3 節で説明する運動量の変化による作用以外の力を受けていると考えられる.

続いて振動型と非振動型の生じる原因について, 水塊衝突時に撮影した水塊衝突形状を比較した. Fig.31 に非振動型と振動型の水塊衝突時の形状を示す. 非振動型は凸形状であるのに対し, 振動型は比較的平らであるように観察できる. しかし水塊観察方法において, 一方向だけの撮影をしているため, 実際の水塊衝突面形状は分からない. そのため, 振動型と非振動型の生じる原因について衝突形状からは, 判断できない.

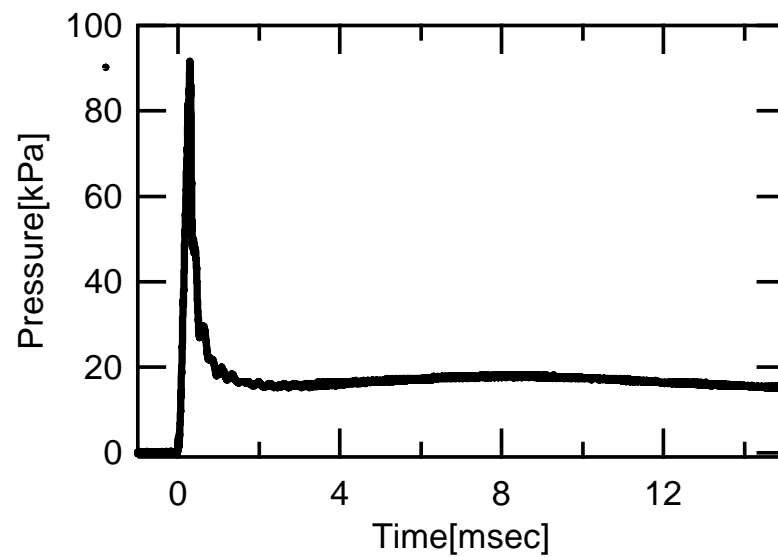


Fig.28(a)非振動型圧力の時間変化

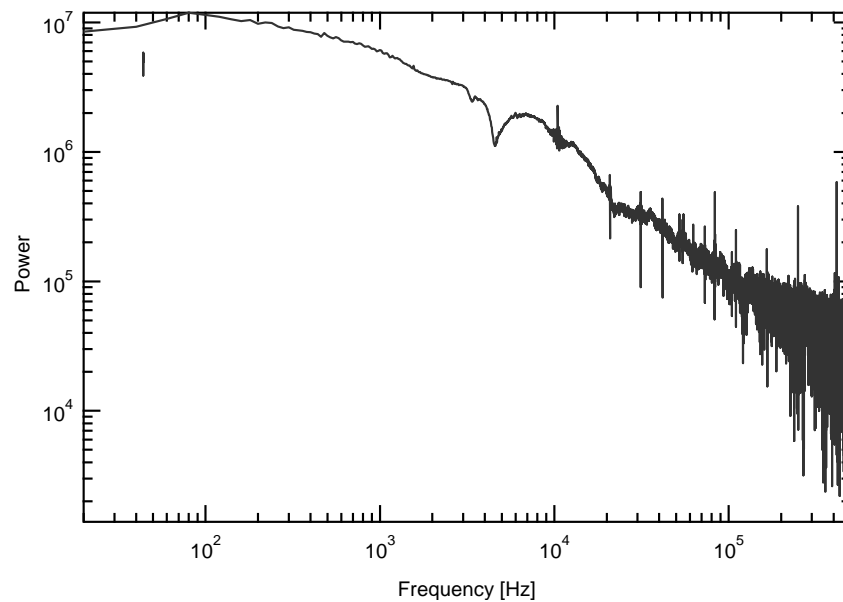


Fig.28(b)非振動型圧力の FFT 解析

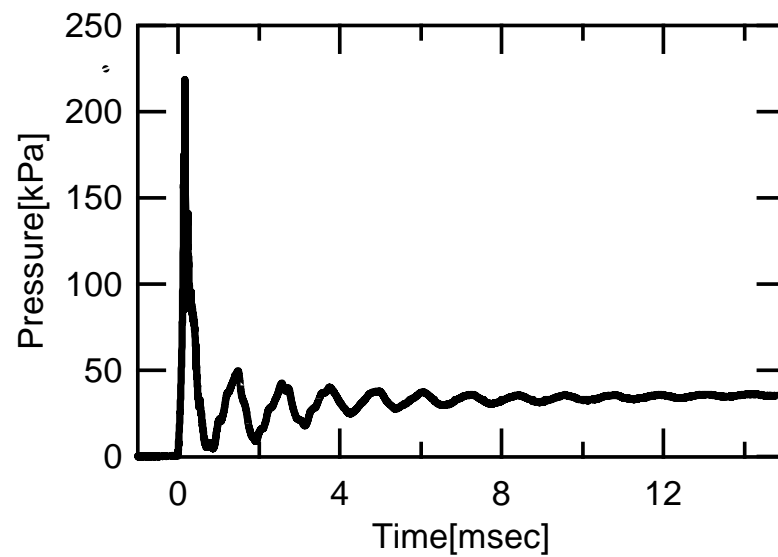


Fig.29(a)振動型圧力の時間変化

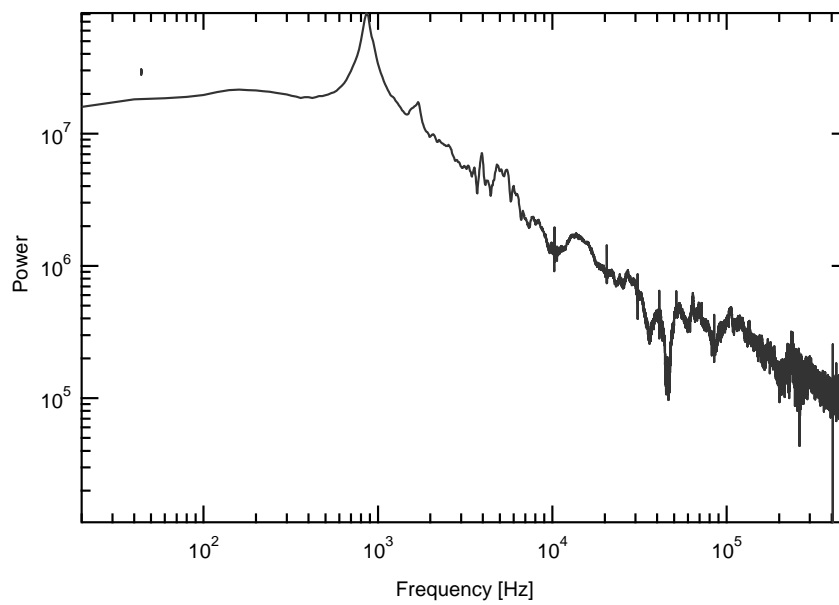
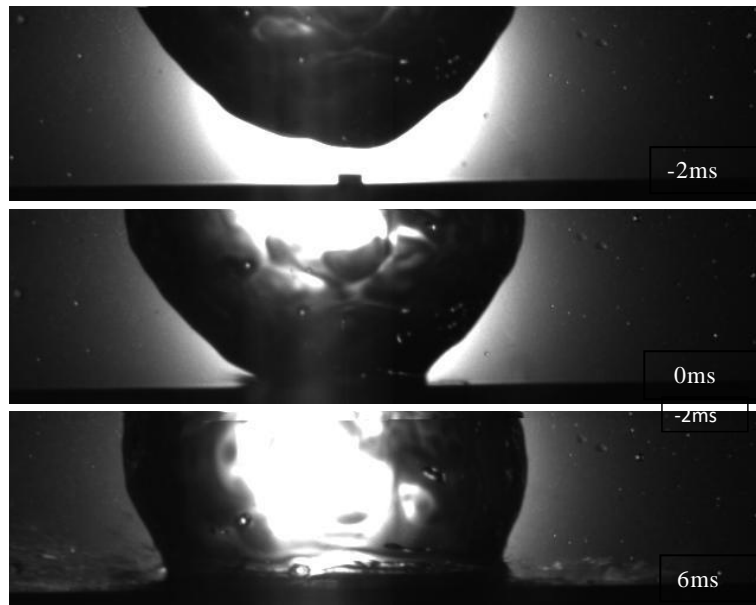
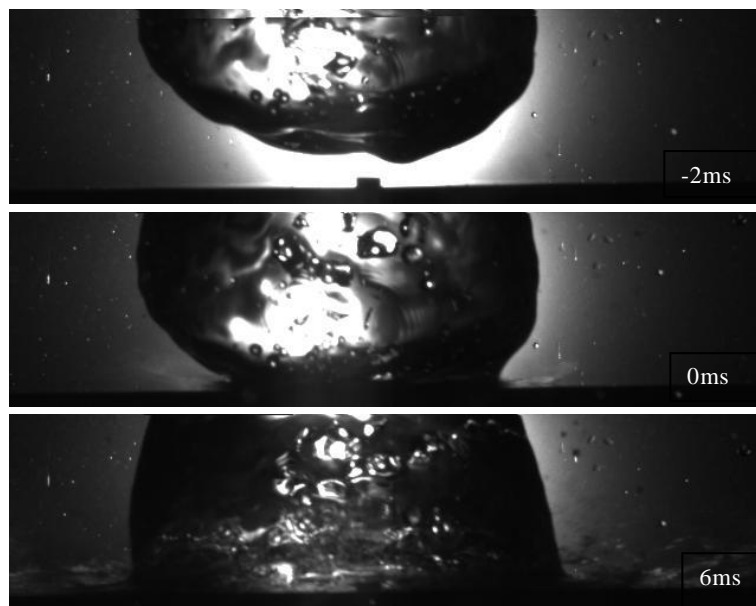


Fig.29(b)振動型圧力の FFT 解析



非振動型水塊衝突形状



振動型水塊衝突形状

Fig.30 水塊衝突形状による比較

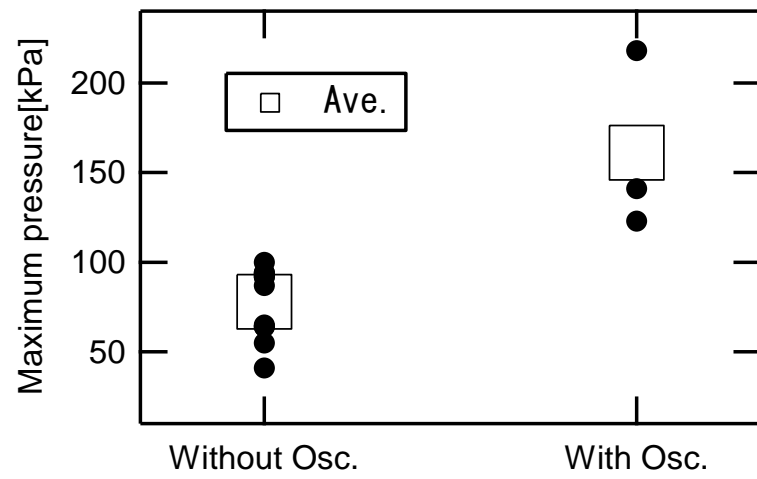


Fig.31 非振動型と振動型の最大圧力比較

3.1.5 水風船を用いた実験

二重の亚克力円筒と針を用いて再現性の高い水塊を作成することができるようになったが，常に理想的な水塊形状で実験を行うことは難しい．また 2.1.2 節において一方向だけの撮影をしているため，実際の水塊衝突面形状は分からない．そのため，振動型と非振動型の生じる原因について衝突形状からは，判断できない．このため，水塊にかえて，水を注入した風船を落下させ，平板に衝突した際の衝撃力の計測を行い，一定の形状を保った状態での衝突を期待した実験を行う．

(ア) 実験概要

Fig.32 に水風船落下装置を示す．実験条件は自由落下型水塊衝突実験の標準条件（落下高さ $H = 500 \text{ mm}$ ，水量 $h = 100 \text{ mm}$ ）とする．風船に注入する水量は $h = 100 \text{ mm}$ に相当する 0.785 L とする．

水風船の落下方法は，自由落下型水塊衝突実験と同様に亚克力円筒にゴムシートを張る．上方から針でゴムシートを破くことはできないので，有機溶剤であるリモネンをゴムシートに下から噴霧して，溶かし破くことで水風船を落とす．

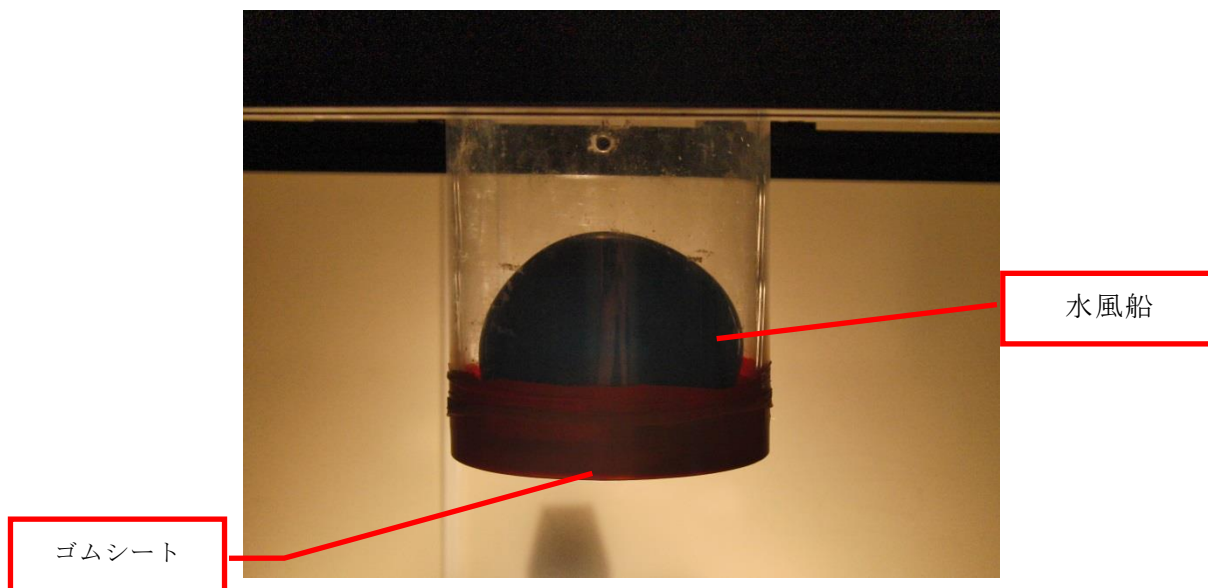


Fig.32 水風船落下装置

(イ) 実験結果

水風船を落下させ、平板に衝突させる実験を5回行なった。圧力の時間変化はFig.33(a)に示す波形となった。このグラフは横軸を時間 (msec)、縦軸は圧力 (kPa) を示す。また、落下する際の水風船の形状は Fig.33 に示すようなきれいな球形をしている。これは、この実験の目的である再現性の高い形状にて繰り返し実験を行うことができると考える。

Fig.33(a)の結果から水風船を用いた衝突実験は、水風船が平板に衝突すると最大圧力を取り、その後急激に圧力が減少する圧力波形を取ることが分かる。これは水塊衝突実験と同様な圧力波形である。FFT 解析結果は(Fig.34b)明確なピークが無い。5回実験すべてで同様の結果であった。

水風船が平板に衝突した際の衝撃圧力（最大圧力）の結果に関して、水塊衝突実験と同様の圧力波形を取ることから、水風船を用いた実験による最大圧力と水塊衝突実験による最大圧力の比較を行った。Fig.35 に比較結果を示す。このグラフは縦軸に圧力 (kPa) を示し、平均値を四角で表す。この結果から水風船の実験の場合は圧力の振動が生じない、また、最大圧力はばらつきが小さくなっていることが分かる。

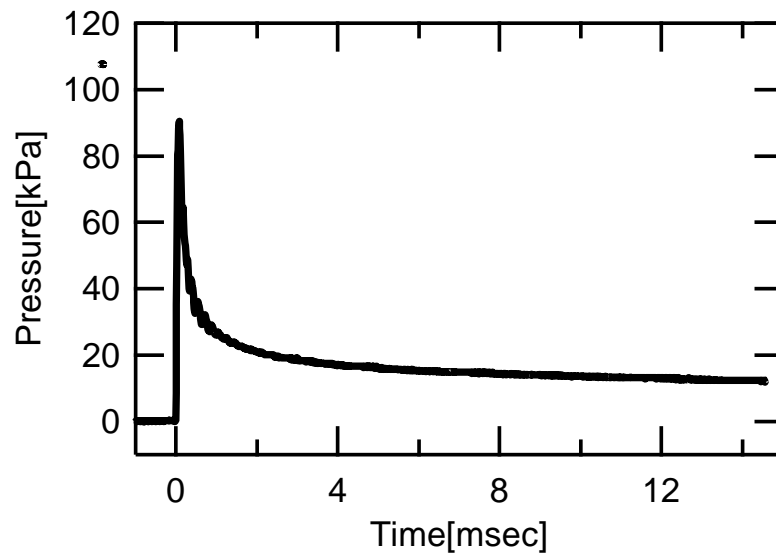


Fig.33(a) 水風船を用いた実験による圧力の時間変化

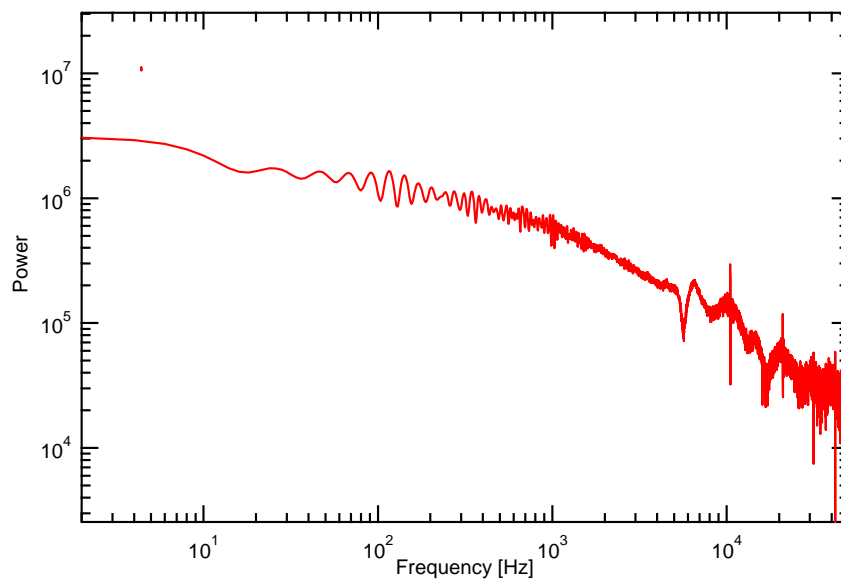


Fig.33(b) 水風船を用いた実験による圧力 FFT 解析

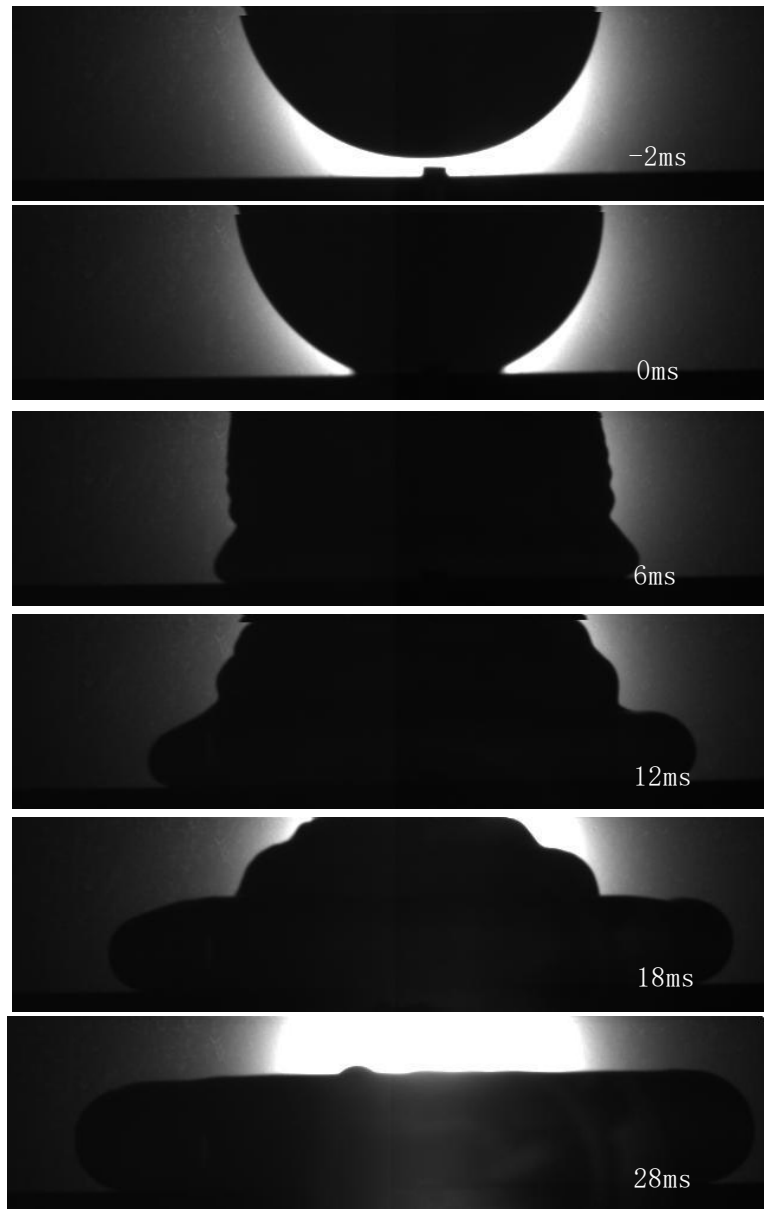


Fig.34 水風船の衝突画像

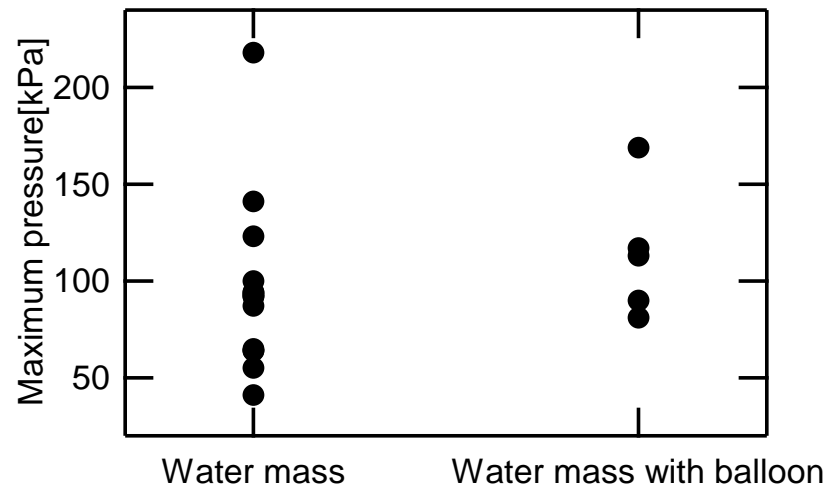


Fig.35 水風船実験と水塊衝突実験の最大圧力比較

3.2 空気膜の挟み込みによる圧力振動

本研究の自由落下型水塊衝突実験において，水塊と平板の間に空気膜が挟まったために振動的な時間変化をしたと考えられる．通常の方法では平板と水塊の間に空気が巻き込んでいるのかどうかを観察することは非常に困難である．ここでは，水塊と圧力センサとの間に穴の空いた平板を設置し，水塊が衝突する際，穴の部分に空気が残る，強制的に空気が挟み込まれることを期待する実験を行なった．

3.2.1 以前の研究理論¹⁾

波浪が構造物に衝突する実際に発生する激しく振動しながら徐々に減衰していく圧力について Hisashi Mitsuyasu によると，以下のように計算されている．この空気巻き込みモデルを Fig.36 に示す．

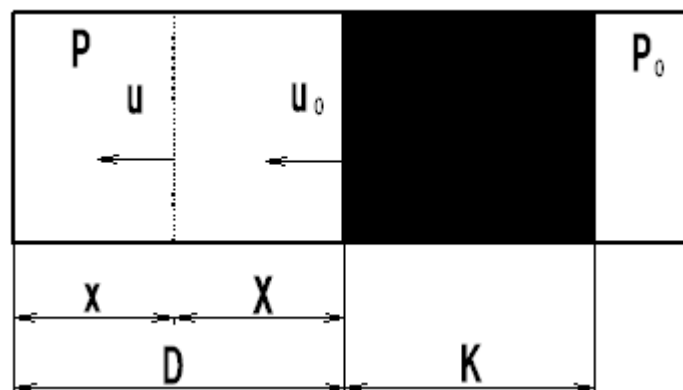


Fig.36 空気巻き込みモデル

水塊の長さを K (cm)，空気の巻き込みの厚さを D (cm)，大気圧を P_0 (kPa)，初速度 U_0 (cm/s)とする．断熱圧縮を仮定したとき，空気の巻き込みの圧力 P は，

$$P = P_0 \left(\frac{D}{x} \right)^\gamma \quad \gamma = 1.4 \quad (1)$$

である．

水塊の運動方程式は、

$$\rho K \frac{d^2 x}{dt^2} = P - P_o \quad (2)$$

と書ける．また、 $x = d$ の時、

$$\frac{dx}{dt} = -V_o \quad (3)$$

式 (3) を初期条件とした時、式 (1) と (2) をまとめると、

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = V^2 = V_o^2 - \frac{2P_o}{\rho K} \left\{ \frac{D}{\gamma-1} \left[\left(\frac{x}{D}\right)^{1-\gamma} - 1 \right] - (D-x) \right\} \quad (4)$$

空気の巻き込みの微小圧縮を仮定したとき、新たに不定の X ($X = D - x$) を導入し、また等式をわずかに修正した後、式 (4) の右辺を展開すると、

$$\frac{dX}{dt} = \pm V_o \left[1 + \frac{2P_o}{\rho K V_o^2} \left\{ X + \frac{D}{1-\gamma} \left[1 - (1-\gamma) \frac{X}{D} + \frac{(1-\gamma)(-\gamma)}{2} \left(\frac{X}{D}\right)^2 - \frac{(1-\gamma)(-\gamma)(-\gamma-1)}{6} \left(\frac{X}{D}\right)^3 + K - 1 \right] \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ここでは、 \pm の+は膨張、-は圧縮を示している．第二項まで取ると、

$$\frac{dX}{dt} = \pm V_o \left[1 - \frac{P_o \gamma}{\rho K V_o^2 D} X^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

となる．

初期条件を $t = 0$ とした時、

$$X = a_1 \sin \frac{V_o}{a_1} t \quad (7a)$$

または,

$$X = a_1 \sin \sigma t \quad (7b)$$

ここで,

$$a_1 = \left(\frac{\rho K V_o^2 D}{P_o \gamma} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \sigma = \left(\frac{P_o \gamma}{\rho K D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式 (1) も式 (4) と同様に X/D に関して展開し, 第二項まで取ると,

$$P - P_o + \frac{\gamma P_o}{D} X + P_o \frac{\gamma(\gamma+1)}{2} \frac{1}{D^2} X^2 \quad (9)$$

式 (9) に式 (7a) を代入すると, 圧力 P は,

$$P - P_o = P_o \frac{\gamma}{D} \left[a_1 \sin \sigma t + \frac{\gamma+1}{2D} a_1^2 \sin^2 \sigma t \right] \quad (10a)$$

または,

$$P - P_o = \rho V_o K \sigma \sin \sigma t + \rho V_o K \sigma \left(\frac{\gamma+1}{2} \frac{a_1}{D} \right) \sin^2 \sigma t \quad (10b)$$

となる.

周波数は $\sigma/f = 2\pi$ の時にあたる.

f を求めると,

$$f = \frac{\left(\frac{P_o \gamma}{\rho K D} \right)^{\frac{1}{2}}}{2\pi} \quad (11)$$

となる.

振動周波数 f は D に比例し，水塊の大きさ K と空気の巻き込み厚さ D によって変わることになる．

3.2.2 実験概要

Fig.37 に実験装置概要を示す．実験方法は自由落下型水塊衝突実験と同様の手法で行う．実験条件は自由落下型水塊衝突実験の標準条件（落下高さ $H = 500$ mm, 水量 $h = 100$ m) とする．圧力センサ上の穴付き平板の穴の直径は 18 mm で，板厚 (D) は 3, 5, 9, 12 mm の平板を用いる(Fig.38)．穴付き平板の素材はセンサの埋め込まれている平板と同様の SUS304 を使用する．

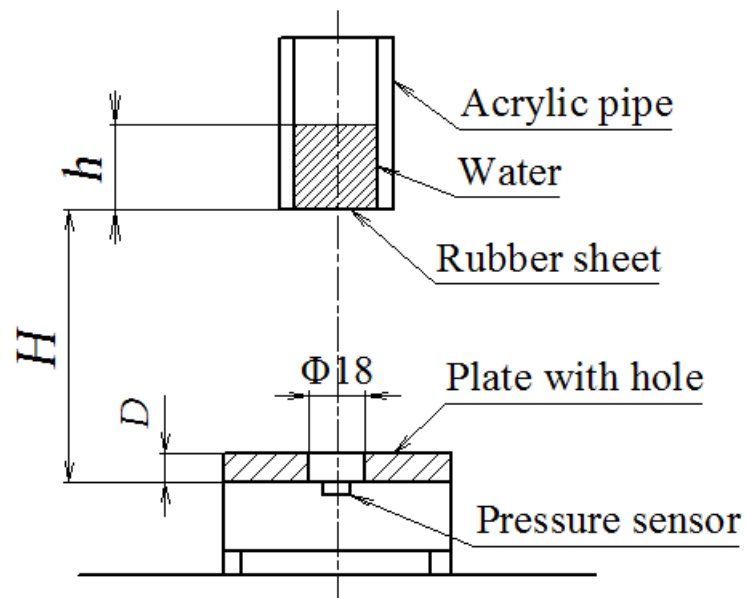


Fig.37 穴付き板実験の概要



Fig.38 穴付き板

3.2.3 実験結果

各板厚において計十回程度実験を行なった．Fig.39a~42a に板厚 3, 5, 9, 13 mm の結果の一例を示す．このグラフは横軸を時間 (msec)，縦軸を圧力 (kPa) で示す．Fig.34 から各板厚にて振動型圧力波形を観察できる．そして，各実験結果を FFT 解析した (Fig.38b~41b)．明確なピークがあらわれる．

この結果から，本研究においても水塊が平板に衝突する際，空気を挟み込んで衝突することで振動型圧力波形を生じていることが分かる．

また，各板厚での最大圧力の比較を行った．Fig.43 にその結果を示す．このグラフは横軸を板厚 (mm)，縦軸を圧力 (kPa) で示し，衝撃圧力の平均値を四角で表す．

この結果から，板厚による最大圧力の差がある．また，板厚 3 mm と 5 mm では実験値のバラつきが大きくなることに対して，板厚 9 mm と 13 mm ではバラつきが比較的小さい．これは，板厚が薄いと空気を挟み込ませる穴が浅くなり，水塊の衝突面形状による影響や運動量の変化による作用を受けやすくなることが考えられる．また，板厚が厚いと空気を挟み込ませる穴が深くなり，空気膜の圧縮による作用だけで最大圧力が決まり，バラつきが小さくなることが考えられる．

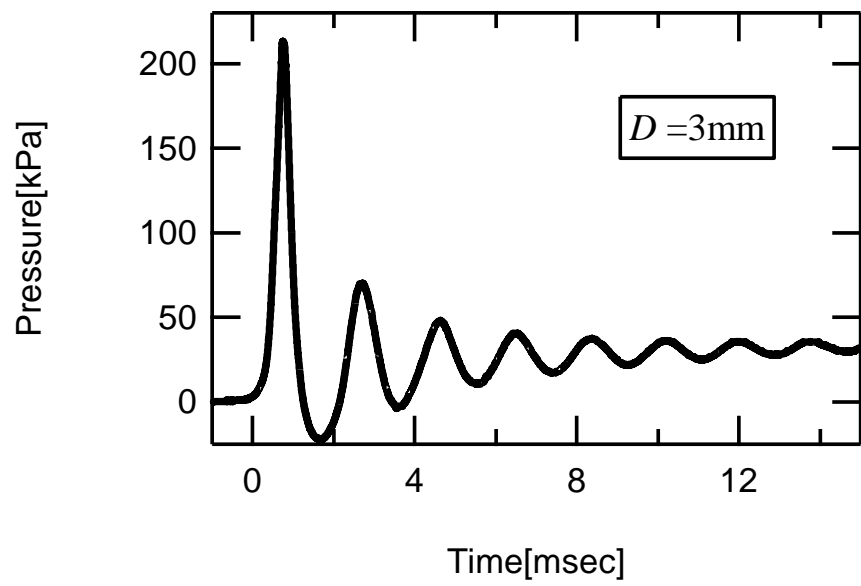


Fig.39 (a) 板厚 3 mm による結果の一例

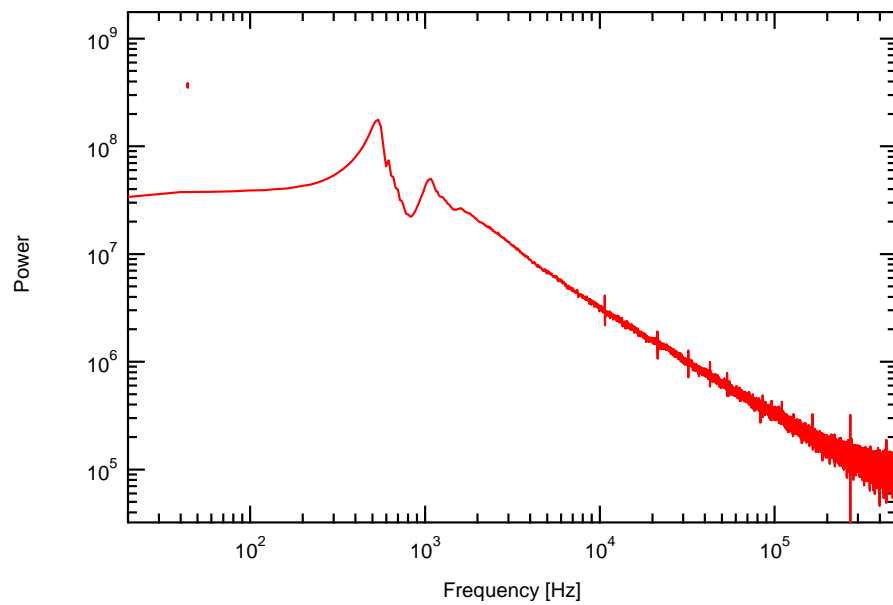


Fig.39 (b) 板厚 3 mm による FFT 解析結果

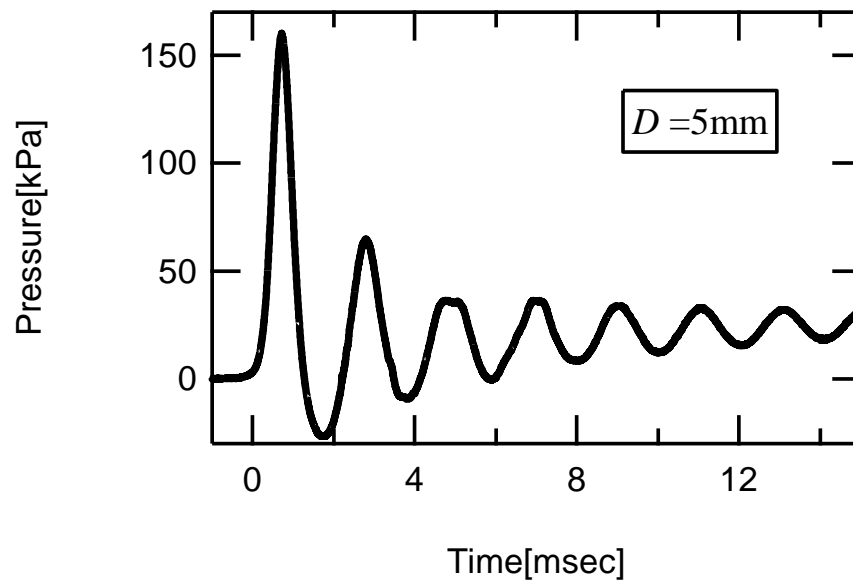


Fig.40 (a) 板厚 5 mm による結果の一例

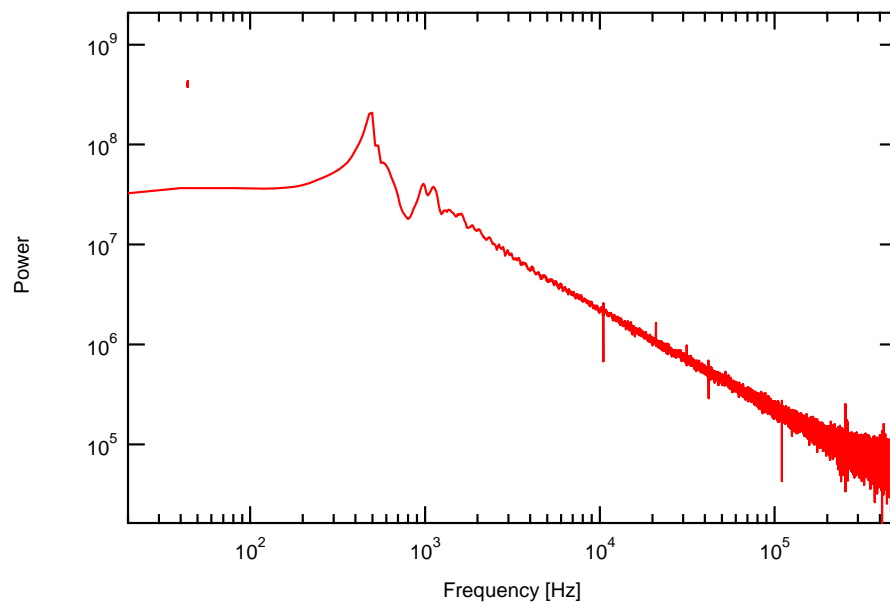


Fig.40 (b) 板厚 5 mm による FFT 解析結果

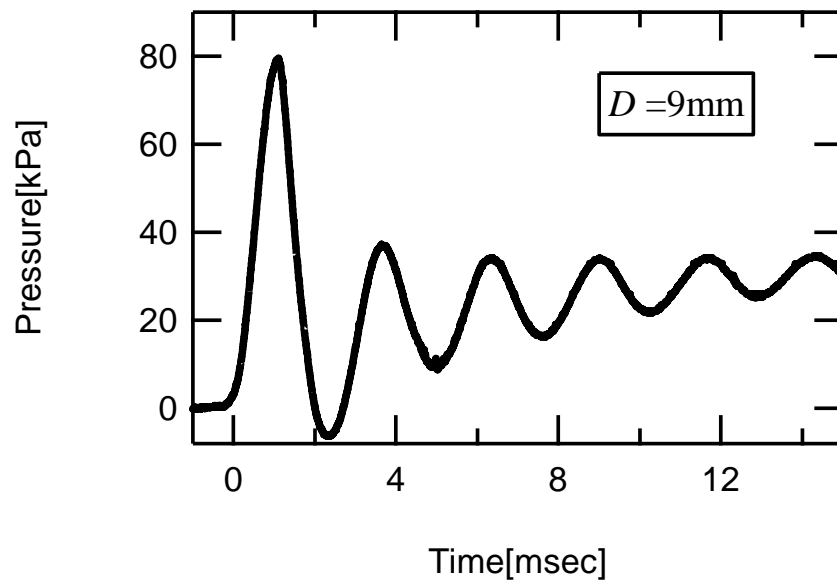


Fig.41 (a) 板厚 9 mm による結果の一例

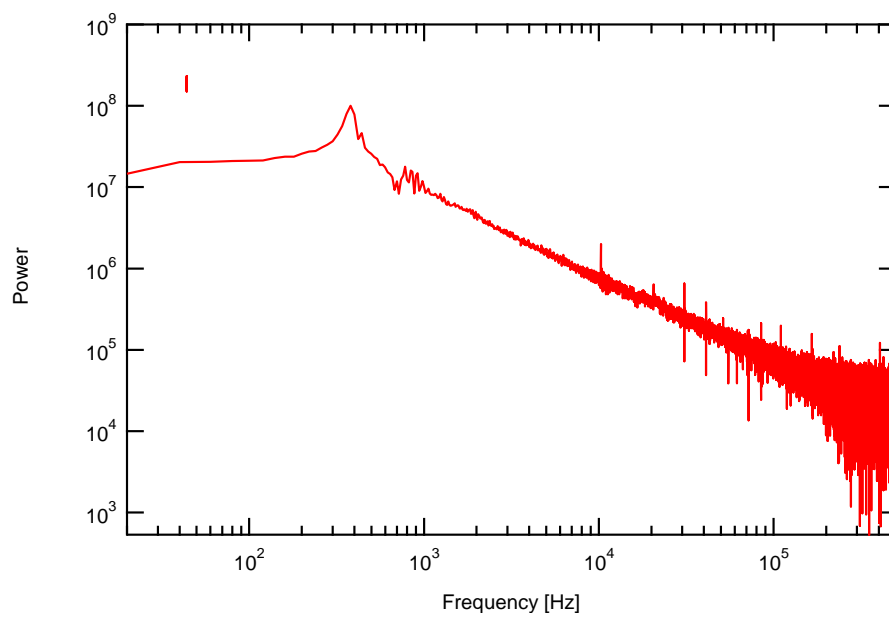


Fig.41 (b) 板厚 9 mm による FFT 解析結果

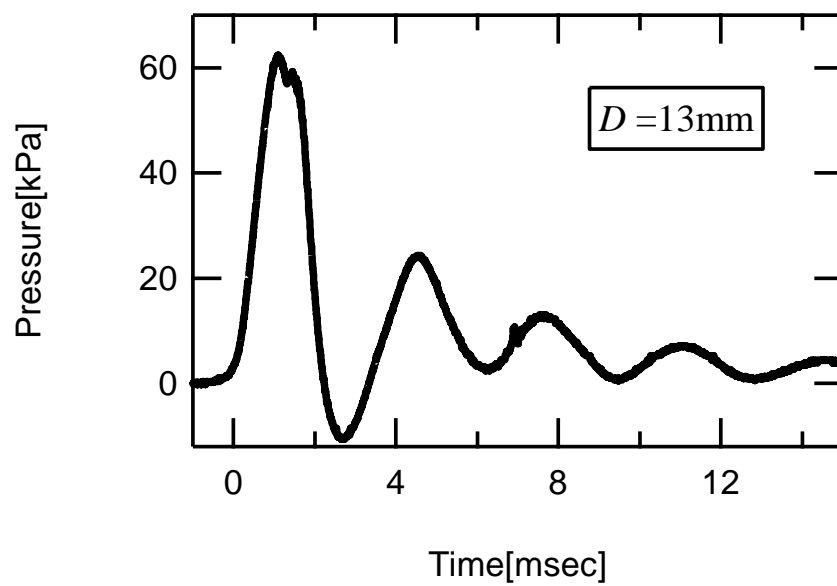


Fig.42 (a) 板厚 13 mm による結果の一例

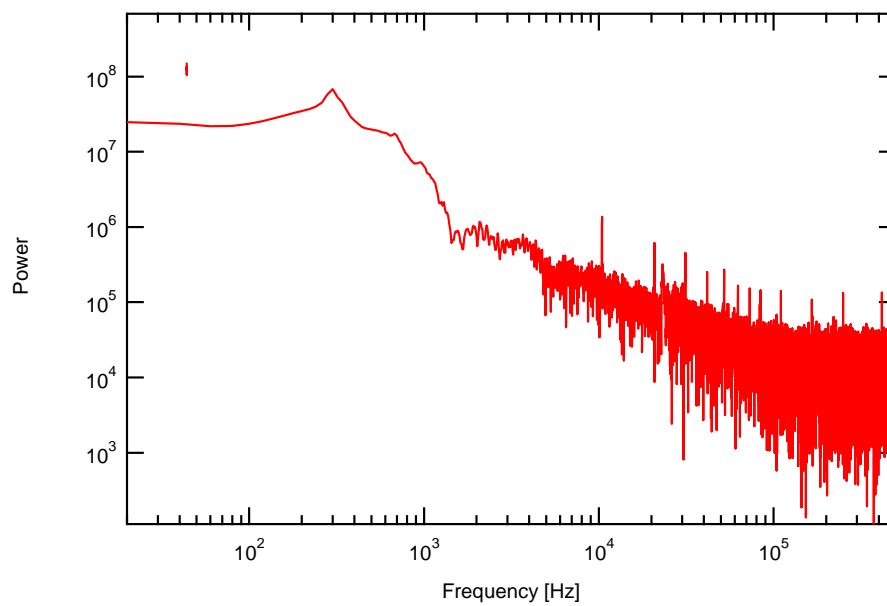


Fig.42 (b) 板厚 13 mm による FFT 解析結果

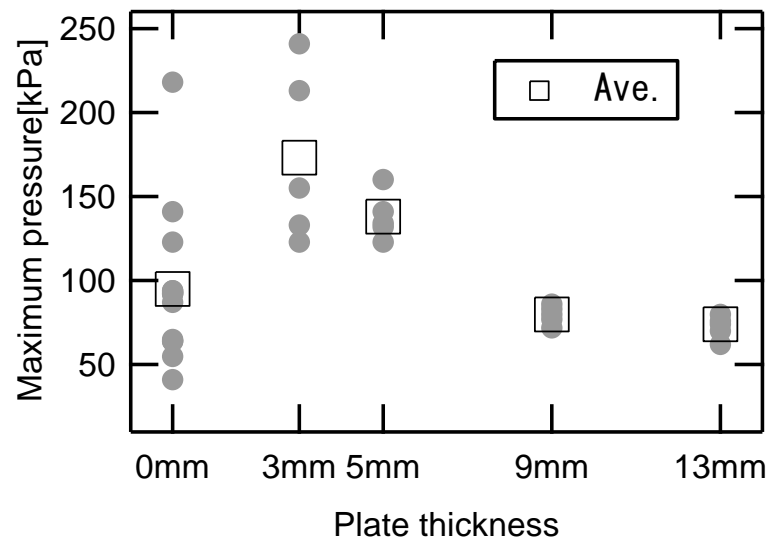


Fig.43 板厚による最大圧力の比較

3.2.4 空気の挟み込み量

式 (11) において，振動周波数 f は空気の挟み込み量 D の値が大きくなると分子が小さくなる．つまり空気の挟み込み量 D が大きくなると周波数 f が小さくなる式であることが分かる．そこで，穴の空いた平板の板厚によって空気の挟み込み量 D の影響を確かめるために，板厚の変化による周波数の比較を行った．

Fig.44 は各板厚での振動周波数の比較である．このグラフは横軸が板の厚さ (mm)，縦軸が周波数 (Hz) を示す．結果によると，板厚が厚くなるほど振動周波数が小さくなることが分かる．これは式 (11) の示す通りである．また，振動周波数が大きくなると，衝撃圧力が大きくなる (Fig.45)．このことから，最大圧力は空気の挟み込み量と関係がある．

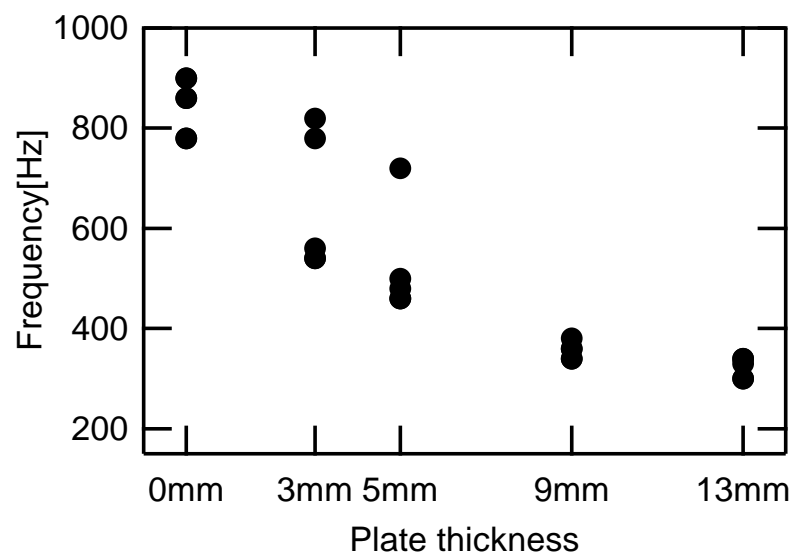


Fig.44 板厚による周波数の変化.

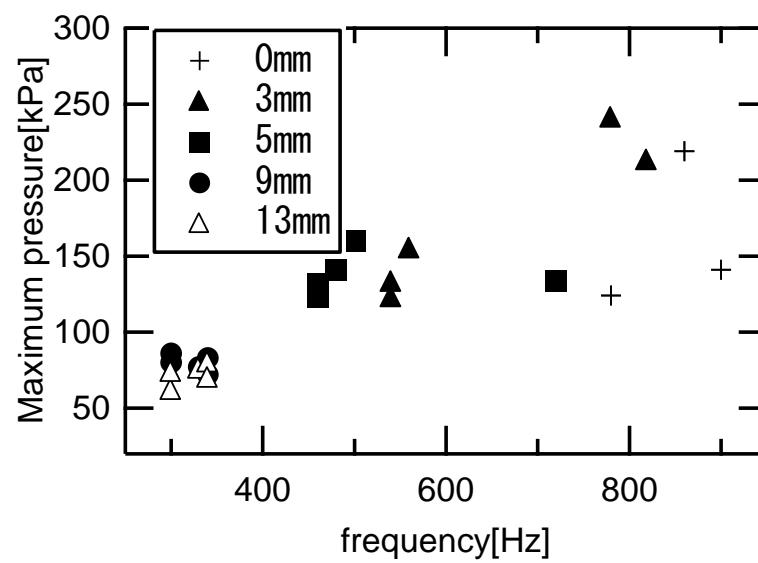


Fig.45 圧力最大値と周波数の関係

第 4 章

結論

4. 結論

本研究では、自由落下する水塊を平板と衝突させることで生じる衝撃圧力について調べた。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 水塊衝突における圧力の時間変化は「振動型」と「非振動型」の二通りに分類できる。
- 2) 振動型の方が最大圧力が大きい。振動型は空気を挟み込みによって生じる。
- 3) 振動周波数が高い場合に最大圧力が大きくなる。つまり、挟み込まれる空気膜が薄い場合に最大圧力が大きくなる。

参考文献

- 1) Hisashi Mitsuyasu : Shock Pressure of Breaking Wave, Coastal Engineering Proceedings, No.10, 1966, pp.268-283.
- 2) 田中健太郎, 木村有希, 岩本勝美 : 水塊と平板の衝突による衝撃圧力, 日本機械学会論文集 (C 編) , 79 卷 805 号, 2013, pp.3169-3176.
- 3) 木村有希, 三尾聡, 田中健太郎, 岩本勝美 : 落下水塊の衝突による衝撃的圧力の発生機構, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 15 号, 2012, pp.389-390.
- 4) 共和電業 HP <http://www.kyowa-ei.com/>.
- 5) 東陽テクニカ HP <https://www.toyo.co.jp>
- 6) 新明和工業 HP <http://www.shinmaywa.co.jp/aircraft/amphibian/>
- 7) Maritime Research Institute Netherlands HP <http://www.marin.nl>

謝辞

本論文は、私呉俊昌が東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科海洋システム工学専攻機械設計研究室在籍中に行なった研究についてまとめたものです。私が無事に研究を終え、論文をまとめることができたのは、おおくの皆様のご助言ならびにごしどうによるものであると感謝しております。ここでその感謝の言葉を述べたいと思います。

田中健太郎准教授には本研究において終始、数え切れないほどのご助言をいただきました。深く感謝いたします。

また研究活動において、学術的な場に参加する機会をいただき、新しい知識や見解を得ることができました。また研究のみならず進路、就職活動での様々なご指導をして頂き、大変お世話になりました。更には、留学生対して、生活面も相談して頂き、大変感謝しています。深く御礼申し上げます。

岩本勝美教授には、研究室内においての研究会で多くの助言をいただき、また就職活動についても多くの助言やお気遣いを頂き本当に感謝しています。本修士学位論文をまとめるにあたり、副指導教員をして頂き、ご指導をいただきました。大変感謝しています。

機械応用力学研究室の地引達弘教授には、本修士学位論文をまとめるにあたり、審査を引き受けていただき、多くの助言、ご指導をいただきました。大変感謝しています。

外山一雄技術職員には実験装置の加工等に際し、多くのご配慮とご支援を頂いたこと、心より感謝致します。

機械設計研究室の皆様には、日本に留学して、このような研究室に入って、心から幸せを感じました。このような時間を与えていただき、大変感謝しています

平成 29 年 2 月
呉 俊昌

付録

本研究に関連する講演は、以下通りである．

- (1) 呉俊昌，田中健太郎，岩本勝美：落下水塊の衝突における空気膜由来の圧力振動，日本機械学会 2016 年次大会 J0910403

また予稿原稿を添付する．